

Список использованных источников

1. Самарский А. А. Теория разностных схем. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1989. 616 с.
2. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 420 с.
3. Свинолобов Н. П., Абраменков Ю. Я. Методы численного решения и математического моделирования процесса теплопроводности: учебное пособие. Днепропетровск: ДМетИ, 1974. 77 с.
4. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. М.: Высшая школа, 1990. 207 с.
5. Шишков М. М. Марочник сталей и сплавов: Справочник. Изд. 3-е доп. Донецк: Юго-Восток, 2002. 456 с.
6. Аверин С. И., Гольдфарб Э. М., Кравцов А. Ф., Радченко И. И., Розенгарт Ю. И., Свинолобов Н. П., Семикин И. Д., Тайц Н. Ю. Расчеты нагревательных печей. – 2-е изд., испр. и доп. Киев: Техника, 1969. 540 с.
7. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Metallurgia, 1975. 368 с.

УДК 669.045

О. А. Зырянцев, В. А. Гольцев

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Институт материаловедения и металлургии,

кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии», г. Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗМОРАЖИВАНИИ

Аннотация

В статье изложены результаты по экспериментальному определению коэффициента температуропроводности сыпучих тел различной влажности, подвергающихся размораживанию. Приведен обзор возможных решений по борьбе со смерзаемостью рудных материалов. Дана подробная классификация решений по борьбе со смерзаемостью от профилактических мер до восстановления сыпучести. Рассмотрены методы определения теплофизических свойств материалов. Приводится описание одного из методов определения коэффициента температуропроводности. Представлены результаты экспериментальных исследований для сыпучих тел с различной влажностью.

Ключевые слова: сыпучесть, размораживание, температуропроводность, концентрат.

Abstract

The article presents the results of experimental determination of the thermal diffusivity of loose bodies of different humidity, thawed. An overview of the possible solutions to fight frozen ore materials. The detailed classification of solutions to fight frozen materials from preventive measures to restore free-flowing. The methods for determining the thermal properties of materials. Describes a method of determining the thermal diffusivity coefficient. The experimental results for granular materials with different humidity have been presented.

Keywords: flowability, thawing, thermal diffusivity, concentrate.

Работа промышленных предприятий, связанных с получением насыпных грузов железнодорожным транспортом, в зимнее время серьезно осложняется тем, что при перевозке грузов в условиях низких температур значительная часть этих грузов подвергается смерзанию и затрудняется их выгрузка.

Особенно сильно смерзаются руды (всех видов), рудные концентраты, песок, уголь и ряд других грузов, которые зачастую превращаются в монолит. В связи с этим выгрузка их из вагонов связана с большими трудностями, с затратой длительного времени и большого количества рабочей силы.

Смерзаемость – свойство товара превращаться в сплошную плотную массу и частично терять свою сыпучесть при отрицательной температуре. Это свойство аналогично слеживаемости груза, по результату они идентичны. При смерзаемости также происходит слипание частиц вещества, которое тем больше и сильнее, чем мельче и шероховатее частицы вещества, больше влажность и пористость его. Смерзаемости в наибольшей степени подвержены пористые, рыхлые, мелкозернистые руды и полезные ископаемые. Крупнокусковые твердые навалочные грузы более устойчивы против смерзаемости.

Мероприятия по борьбе со смерзаемостью могут быть профилактические, т. е. предупреждающие смерзание, и восстанавливающие сыпучесть смерзшегося груза. Профилактические мероприятия производятся грузоотправителем. Они должны быть безвредны либо полезны для последующего использования груза по назначению. Мероприятия, восстанавливающие сыпучесть груза, требуют больших затрат энергии, труда и времени и отрицательно сказываются на организации транспортного процесса.

Способы борьбы со смерзаемостью делятся по принципу действия на физические, химические, физико-химические и механические.

К физическим способам относятся: замораживание с последующим разрушением корки для придания крупнокусковой структуры; обезвоживание объектов; выстилание дна и стен вагонов и судов; создание несмерзающихся прослоек (пересыпка) из гигроскопических материалов – опилок, соломы, камыша; обмасливание груза минеральными маслами; оттаивание (размораживание) в специальных закрытых помещениях – тепляках или нагревательных камерах или под открытым небом – паром, горячей водой, горячим воздухом или продуктами сгорания, инфракрасными излучателями. Для оттаивания смерзшегося в вагонах груза применяют инфракрасные излучатели, представляющие собой тепловые экраны с установленными на них специальными лампами инфракрасного излучения, либо керамические и металлические поверхности, нагреваемые газом, электроспиралью. Экраны должны иметь температуру 550–650° С. Наивыгоднейшее расположение ламп и экранов от материала 160–480 мм.

Химические способы основаны на способности некоторых химических веществ поглощать влагу из груза и при этом выделять тепло. Обычно для этих целей используют негашеную известь из расчета 15–30 кг извести на 1 т груза. Известью нельзя обрабатывать руды, идущие на флотацию, в частности медные руды. В остальных случаях химические способы безвредны. Препарат либо смешивается с грузом, либо засыпается под него. Физико-химические способы основаны на способности некоторых химических веществ образовывать водные растворы с низкой температурой замерзания. Так, например, 23,1 %-ный водный раствор NaCl замерзает при температуре – 22,4 °С, а 58,8 % раствор CaCl₂ – при температуре – 54,9 °С. Механические способы предусматривают рыхление смерзшегося груза.

Наиболее рациональны профилактические меры – выпуск продукции с влажностью, предотвращающей смерзаемость и замораживание товара с перелопачиванием. В зимнее время руды должны иметь влажность не более 4 %, мелкокусковые пористые каменные угли – не более 5, апатитовый концентрат – не более 0,5 %.

Восстановление сыпучести смерзшихся или слежавшихся объектов проводят обычно рыхлением при помощи пневматических или электрических отбойных молотков, специальных бурорыхлительных, вибруыхлительных механизмов.

Для отработки тепловых режимов работы гаража размораживания руд требуется знание теплофизических свойств медного концентрата и изменения этих характеристик в зависимости от изменения влажности шихты.

Большинство задач металлургической теплотехники решено численными методами и методами математического моделирования [3–6]. Использование этих аналитических решений очень важных задач нестационарной теплопроводности часто практически невозможно из-за отсутствия надежных данных о значениях коэффициента теплоотдачи и коэффициентов, характеризующих теплофизические свойства нагреваемых (охлаждаемых) материалов. Так как изменение температурного поля твердого тела зависит от внутреннего (S/λ) и внешнего ($1/\alpha$) тепловых сопротивлений, то при отсутствии значений коэффициентов теплопроводности и теплообмена невозможно произвести расчет и выбор оптимального режима тепловой обработки материалов.

Таким образом, наиболее надежным способом определения теплофизических свойств материалов является прямой эксперимент.

В последнее время трудности непосредственного измерения явления теплопроводности и стремление получить максимальную информацию о теплофизических свойствах одного и того же образца привели к созданию ряда новых методов исследований, в том числе импульсных [7], регулярных [8] и квазистационарных [9]. Наиболее распространенными являются методы, позволяющие в одном эксперименте устанавливать максимум информации о теплофизических свойствах исследуемого материала [10]. Наиболее приемлемым методом для определения температуропроводности железорудных материалов, отвечающих конкретным условиям их тепловой обработки, является метод, основанный на квазистационарном режиме нагрева образца. Сущность его осуществления вытекает из решения дифференциального уравнения теплопроводности при условии постоянства скорости нагрева и наличия разности температур по сечению тела в начальный момент времени. Методики и приборы, основанные на квазистационарном тепловом режиме, являются наиболее перспективными, так как характеризуются простотой эксперимента и расчетных соотношений.

Можно показать, что в случае зависимости свойств материала от температуры регулярный режим достигают лишь при постоянстве температурного перепада в образце [11], а осуществление его нагрева (в контрольных точках) значительно сложнее, чем при постоянной скорости изменения температуры на поверхности образца. Кроме того, нагрев такого рода (с постоянным перепадом температур) был бы несколько искусственным и плохо соответствовал действительному процессу обжига материалов в тепловых установках.

Из известных нестационарных методов измерения теплофизических свойств материалов (метод импульсного источника, регулярного режима при постоянной скорости на поверхности образца и т. д.) наиболее предпочтительным является метод измерения в регулярном режиме при изменении температуры поверхности образца с постоянной скоростью (хотя бы в небольшом интервале времени). Достоинства данного метода состоят в следующем:

- охватывает все возможные режимы нагрева образца;
- может быть применен в том случае, когда свойства материала значительно зависят от температуры (методическая ошибка при этом ничтожна мала);
- может быть использован при наличии в теле образца равномерно распределенных источников теплоты.

Проведенный анализ существующих методов измерения теплофизических свойств позволяет выбрать наиболее приемлемый из них применительно к многокомпонентным системам, каковыми являются материалы металлургического производства. Так, для измерения энтальпии и средней теплоемкости материалов наиболее пригодным оказался метод смешения, реализуемый на установке с адиабатическим калориметром. Для определения коэффициента температуропроводности был выбран метод, позволяющий производить измерения его значений в иррегулярном режиме, вызванном поглощением или выделением значительного количества теплоты в образцах при нагреве. Теплопроводность материалов целесообразно находить по установленным заранее теплоемкости, плотности и температуропроводности из выражения: $\lambda = \alpha c \rho$.

Ниже рассматривается методика измерения температуропроводности, основанная на особенностях регулярного режима.

Для проведения экспериментальных исследований был использован измеритель – регулятор температуры типа Термодат-25К1 класса точности 0,25. Анализируемый образец вначале высушивали при 100 °С для удаления влаги, взвешивали и добавляли воду до заданной влажности. Тщательно перемешанный с водой материал помещали в цилиндрический сосуд из металла с высоким коэффициентом теплопроводности и устанавливали две термопары градуировки К – в центре и на боковой поверхности. Затем подготовленный образец помещали в герметичный пакет и замораживали в морозильной камере холодильника. Далее цилиндр с сырьевым материалом размораживали на воздухе, фиксируя показания термопар через 500 миллисекунд.

Суть метода определения коэффициента температуропроводности состоит в следующем. Если температура среды, в которой находится исследуемый образец, изменяется со временем по линейному закону $t = c\tau$, °С (c – скорость нагрева, град/с; τ – время, с), а теплообмен в системе тело – среда осуществляется при граничных условиях 3-го рода, то для оси цилиндра неограниченной длины радиуса R ($r = 0$) через τ ч температура может быть определена из выражения, °С:

$$t_y = c\tau - \frac{cR^2}{4a} + \frac{cR^2}{a} \Phi\left(\frac{a\tau}{R^2}\right).$$

Разность температур на поверхности и по оси цилиндра, °C

$$\Delta t = t_n - t_y = \frac{cR^2}{4a} - \frac{cR^2}{a} \Phi\left(\frac{a\tau}{R^2}\right). \quad (1)$$

При $\frac{a\tau}{R^2} \geq 0,5$ (т.е. $\tau \geq \frac{0,5R^2}{a}$) значение функции становится весьма малым и им можно пренебречь. Тогда

$$t_y = c\tau - \frac{cR^2}{4a}, \text{ } ^\circ\text{C}; \Delta t = \frac{cR^2}{4a}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Следовательно, значения температуры на оси цилиндра t_y и на его поверхности t_n начинают изменяться по прямой линии, а разность температур поверхности и оси Δt становится постоянной, т. е. наступает регулярный режим нагрева. Если в начальный момент разность температур между поверхностью и осью цилиндра равна Δt_0 , то уравнение (1) может быть представлено в виде

$$\frac{\Delta t}{c\tau} = \frac{R^2}{4a} - \left(\frac{R^2}{ac} - 4\frac{\Delta t_0}{c\tau}\right) \Phi\left(\frac{a\tau}{R^2}\right). \quad (2)$$

Так как $\frac{a\tau}{R^2} = Fo$ – критерий Фурье, то выражение (2) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{\Delta t}{c\tau} = \frac{\tau}{4Fo} - \left(\frac{1}{Fo} - 4\frac{\Delta t_0}{c\tau}\right) \Phi\left(\frac{a\tau}{R^2}\right). \quad (3)$$

Здесь Δt_0 и Δt – разность температур между периферией (поверхностью) и осью образца в начале и конце изучаемого участка, °C; $\frac{\Delta t_0}{c\tau}$ и $\frac{\Delta t}{c\tau}$ – безразмерные величины (симплексы); $\Phi(Fo)$ – функция критерия Фурье [1].

Значение критерия Фурье, из которого определяли величина коэффициента температуропроводности, находили по экспериментально найденным величинам $\frac{\Delta t_0}{c\tau}$ и $\frac{\Delta t}{c\tau}$ из диаграммы нагрева образца [2]. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Результаты экспериментов

Номер эксперимента	Влажность, %	a , м ² /ч	τ , с
1	0	$3,58 \cdot 10^{-7}$	956
2	1	$4,49 \cdot 10^{-7}$	990
3	3	$1,06 \cdot 10^{-6}$	1293
4	5	$1,63 \cdot 10^{-6}$	1462
5	7	$2,34 \cdot 10^{-6}$	1655
6	9	$2,48 \cdot 10^{-6}$	1822

Выводы:

1. Отработана методика расчета коэффициента температуропроводности для сыпучих сырьевых материалов различной влажности при их размораживании.

2. Полученные в опытах значения коэффициента температуропроводности будут использованы для отработки тепловых режимов гаража-размораживателя ОАО «СУМЗ».

Список использованных источников

1. Осиновских Л. Л. и др. Температуро- и теплопроводность доменных шлаков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1977. – № 5. – С. 36–40.
2. Рафалович И. М. и др. Определение теплофизических свойств металлургических материалов. М.: Металлургия, 1971. – 160 с.
3. Панов Д. Ю. Справочник по численному решению дифференциальных уравнений в частных производных. М.: Гостехиздат, 1949. 183 с.
4. Сучков В. Д. Исследование теплофизических свойств материалов металлургического производства: кандидатская диссертация. Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1971. 145 с.
5. Ваничев А. П. Приближенный метод решения задач теплопроводности при переменных константах // Известия АН СССР. ОТН. 1946. № 12. С. 1767–1774.
6. Лукьянов В. С. Гидравлические приборы для технических расчетов // Известия АН СССР. ОТН. 1939. № 2. С. 5–9.
7. Зиновьев В. Е. Температуропроводность и теплопроводность некоторых переходных металлов при высоких температурах: кандидатская диссертация. Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1969. 156 с.
8. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. Л.: Гостехиздат, 1954. 211 с.
9. Кудрявцев Е. Б., Чекалев К. Н., Шумаков Н. В. Нестационарный теплообмен. М.: Наука, 1961. 158 с.
10. Шашков А. Г., Волохов Г. М., Абраменко Т. Н. и др. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. М.: Энергия, 1973. 336 с.
11. Ярошенко Ю. Г., Хомутийн В. С., Юрьев Б. П., Швыдкий В. С. Особенности измерения температуропроводности методом регулярного режима с учетом ее зависимости от температуры // Известия АН СССР. Металлы. 1977. № 1. С. 70–73.

УДК 669.045

С. И. Кондрашенко, В. Р. Тихонова

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СТРУЙНОГО РЕКУПЕРАТОРА

Аннотация

В данной работе с помощью программно-вычислительного комплекса FloEFD производилось моделирование двух вариантов подогрева воздуха от греющей поверхности рекуператора. В первом случае воздух движется вдоль греющей поверхности рекуператора, а во втором струи воздуха «атакуют» греющую поверхность. Приведены значения коэффициентов теплоотдачи и плотности тепловых потоков на греющей поверхности рассматрива-